

УДК 621.382.22

## НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ ДИОДА ШОТТКИ НА 4Н-SiC С ОХРАННЫМИ КОЛЬЦАМИ ИЗ АЛЮМИНИЯ

Сурин Б. П., Калабаев И. С.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева», г. Саранск

Тел.: +7 (843-2)29-06-69, e-mail: [surin\\_bp@mail.ru](mailto:surin_bp@mail.ru)

**Аннотация.** Обсуждается влияние ширины плавающего охранного кольца на напряжение лавинного пробоя диода Шоттки по результатам моделирования в САПР TCAD. В качестве объекта выбран диод Шоттки на 4Н-SiC и охранные кольца, которые могут быть получены напылением Al. Показано, что на зависимости напряжения пробоя от ширины колец существует максимум, и максимальное напряжение пробоя достигается при ширине плавающих охранных колец 2 мкм.

**Ключевые слова:** лавинный пробой, диод Шоттки, плавающее охранное кольцо.

### Постановка задачи

Напряжение лавинного пробоя полупроводниковых приборов на основе 4Н-SiC примерно в 200 раз выше, чем кремниевых, а при том же напряжении пробоя сопротивление во включенном состоянии ниже [1 – 3]. Это делает материал перспективным для изготовления силовых полупроводниковых приборов.

Процесс изготовления приборов на основе 4Н-SiC затрудняется тем, что диффузия примесей практически не идет при температурах, достижимых в обычном технологическом процессе. В силу этого диод Шоттки, для изготовления которого нужно только напылить пленку металла (и произвести отжиг), является самым «обычным» прибором, изготавливаемым на основе этого материала. К тому же, диоды Шоттки, в которых ток переносится основными носителями заряда, имеет высокую скорость переключения.

Конструктивный недостаток диодов Шоттки – это малый радиус кривизны области пространственного заряда (ОПЗ) на краю анода (контакта, на котором создан барьер Шоттки, обладающий выпрямляющим действием) [2, 3]. Как следствие, здесь повышается напряженность электрического поля и, при приложении обратного смещения, развивается лавинный пробой при напряжениях намного меньше того, при котором пробой происходил бы в центральной части анода диода Шоттки. Для повышения напряжения пробоя на краю анода создают охранные структуры, которые «растягивают» область пространственного заряда вдоль поверхности и/или увеличивают радиус кривизны.

Один из эффективных приемов – это создание плавающих охранных колец (проводящих областей, которые не подсоединяются ни к какому источнику питания). По мере увеличения обратного смещения эти кольца попадают в область пространственного заряда анода, заряжаются, на них наводится потенциал. В результате около охранного кольца создается ОПЗ, соединения с ОПЗ анода. Это приводит к уменьшению напряженности электрического поля на аноде и, следовательно, к уменьшению скорости лавинного умножения носителей заряда. Плавающее охранное кольцо действует как делитель напряжения и существенно уменьшает кривизну границ области пространственного заряда основного перехода [1].

Недостатком такой конструкции края анода является то, что часть площади кристалла, на котором создается диод Шоттки, не участвует в пропускании тока при прямом смещении. Эффективность использования площади кристалла уменьшается. По этой причине стараются оптимизировать структуру плавающих охранных колец [1-5]. В частности, давно установлено, что существует оптимальное расстояние между анодом и плавающими охранными кольцами, при котором достигается максимальное напряжение пробоя всей структуры. Если это расстояние выбрать очень маленьким, то охранное кольцо окажется при потенциале анода, и

напряженность поля на нем будет сопоставима с напряженностью электрического поля на аноде. Если охранный пояс не увеличит радиус кривизны ОПЗ, что можно достичь глубокой диффузией, то напряжение пробоя просто произойдет не на краю анода, а на краю кольца. С другой стороны, если расстояние слишком велико, ОПЗ анода не достигнет охранных колец.

Методика расчета оптимальной системы плавающих охранных колец в виде  $p^+-n$ -переходов, создаваемых ионным легированием бора с энергиями до 350 кэВ, опубликованы в [4]. По-видимому, ионное легирование – это наилучший метод создания охранных структур для диодов Шоттки на карбиде кремния. Однако, использование этого метода нуждается в использовании дорогостоящих установок для ионного легирования.

В [5] сообщается об использовании для создания плавающих охранных колец напыленного алюминия. Охранные кольца работают благодаря возникновению выпрямляющих барьеров Шоттки алюминия на карбиде кремния. Авторам удалось повысить напряжение пробоя с 250 В до 1200 В. Мы попытались с помощью математического моделирования в САПР TCAD повторить результаты [5] и, при этом, получили любопытный результат: напряжение пробоя зависит от ширины кольца.

В литературе, как правило, обсуждается влияние на напряжение пробоя полупроводникового прибора способа создания охранных колец, расстояния между плавающими охранными кольцами. В [5] описаны результаты расчетов, которые предсказывают монотонное увеличение напряжения пробоя с увеличением ширины колец. В [2] отмечается, что эффективность плавающего охранных колец становится незначительной, если его ширина слишком мала. И делается вывод, что ширина плавающего охранных колец должны быть, по меньшей мере, равной ширине области пространственного заряда плоскопараллельного перехода при напряжении пробоя.

### Вычислительный эксперимент

Мы провели моделирование аналогичной структуры в САПР TCAD версии 7.0 с использованием скорректированного файла параметров карбида кремния. Для моделирования создавалась модель диода Шоттки, часть которой показанная на рис.1. Общий размер структуры по оси X составляет 500 мкм. Подложка образована 4H-SiC, легированного донорной примесью (азот) до уровня  $3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Эпитаксиальный слой толщиной 15 мкм легирова-

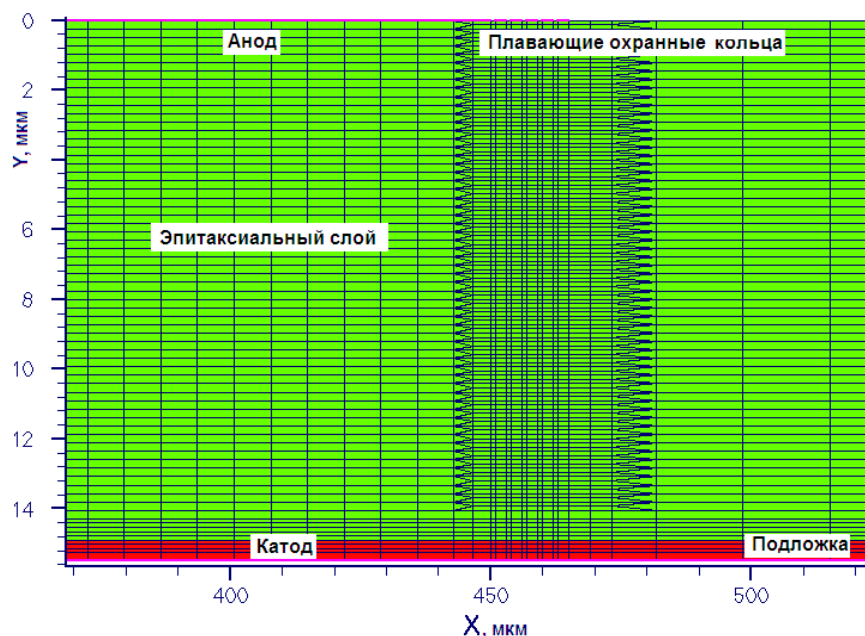


Рис. 1. Часть модели диода Шоттки с пятью плавающими охранными кольцами

на донорной примесью с концентрацией  $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Анод и плавающие охранные кольца заданы как контакты Шоттки. Высота барьера Шоттки на аноде задавалась равной 0,8 эВ. Такой контакт может быть создан с использованием Ni или Ti [2].

Высота барьера Шоттки плавающих охранных колец составляла 1,3 эВ. Такой контакт может быть создан напылением алюминия. Мы задавали 5 эквидистантных колец равной ширины. Изменяли расстояние между кольцами и их ширину.

Создание полевой пластинки [1 – 3], также повышающей напряжение пробоя диода Шоттки не предусматривалось в целях «чистоты эксперимента».

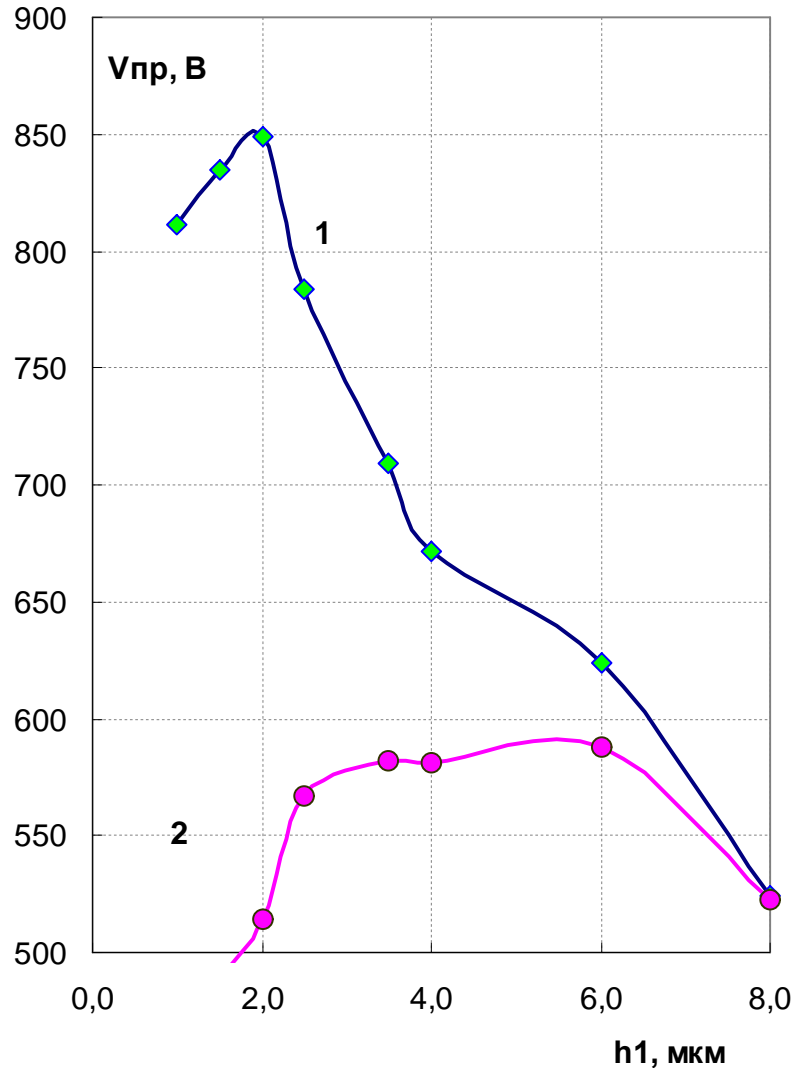
При моделировании использовалась цилиндрическая система координат с осью симметрии при  $X = 0$ . То есть, фактически производилось моделирование круглого диода Шоттки с диаметром анода 900 мкм. В программе DESSIS CAP TCAD решалось уравнение Пуассона с учетом концентрации свободных носителей заряда, уравнения непрерывности для электронов и дырок с учетом зависимости подвижности носителей заряда концентрации примеси и от напряженности электрического поля. Учитывалось лавинное умножение носителей заряда. За напряжение пробоя выбиралось напряжение, при котором интеграл ионизации электронов или дырок, вычисленный вдоль траектории с максимальной напряженностью электрического поля, становился равным единице. Решение – квазистатическое.

Потенциал катода при моделировании задавался равным нулю. Изменялось напряжение на аноде. Для анода задается граничное условие первого рода. Для плавающих охранных колец определено граничное условие второго рода (то есть, задана контактная разность потенциалов 1,3 В, и ток, равный нулю). При этом для каждого кольца в программе DESSIS CAP TCAD рассчитывается его потенциал относительно катода.

Сначала, задав ширину колец, равной 2 мкм, нашли, что максимальное напряжение пробоя достигается при расстоянии между кольцами, равным 3,2 мкм.

Затем стали менять ширину колец. Результаты, напряжение пробоя диода Шоттки и напряжение на первом от анода охранном кольце, показаны на рис.2.

Видно, что максимальное напряжение пробоя достигается при ширине колец 2 мкм. Конечно, этот факт еще нуждается в проверке, но качественно объясним. Плавающее охранное кольцо, в нашем случае имеющее идеальную проводимость, «усредняет» напряжение по своей ширине. Следовательно, если оно очень широкое, то на нем создается невысокий потенциал, меньший, чем при оптимальной ширине, и доля общего напряжения, «отнимаемого» кольцом [1], уменьшается. Это ведет к росту напряженности электрического поля на краю анода и, следовательно, к понижению напряжения пробоя диода Шоттки.



1 – напряжение пробоя диода Шоттки. 2 – напряжение на первом кольце.  
 Рис. 2. Зависимость напряжения пробоя диода Шоттки и напряжения на первом плавающем охранном кольце от ширины кольца

Напряжение на первом охранном кольце также имеет максимум. При ширине от 2,5 мкм до 6 мкм оно практически остается постоянным. И при ширине кольца 8 мкм оказывается равным напряжению пробоя. На рис.3 показан график зависимости отношения напряжения пробоя диода Шоттки к напряжению на первом охранном кольце в зависимости от ширины кольца.

Видно, что зависимость отношения напряжения пробоя к напряжению на первом охранном кольце стремится к насыщению при ширине кольца 8 мкм. Однако отметим, что полученные результаты относятся к случаю, когда проводимость кольца бесконечно большая: мы задаем плавающее охранное кольцо только как граничное условие второго рода в определенной области поверхности модели.

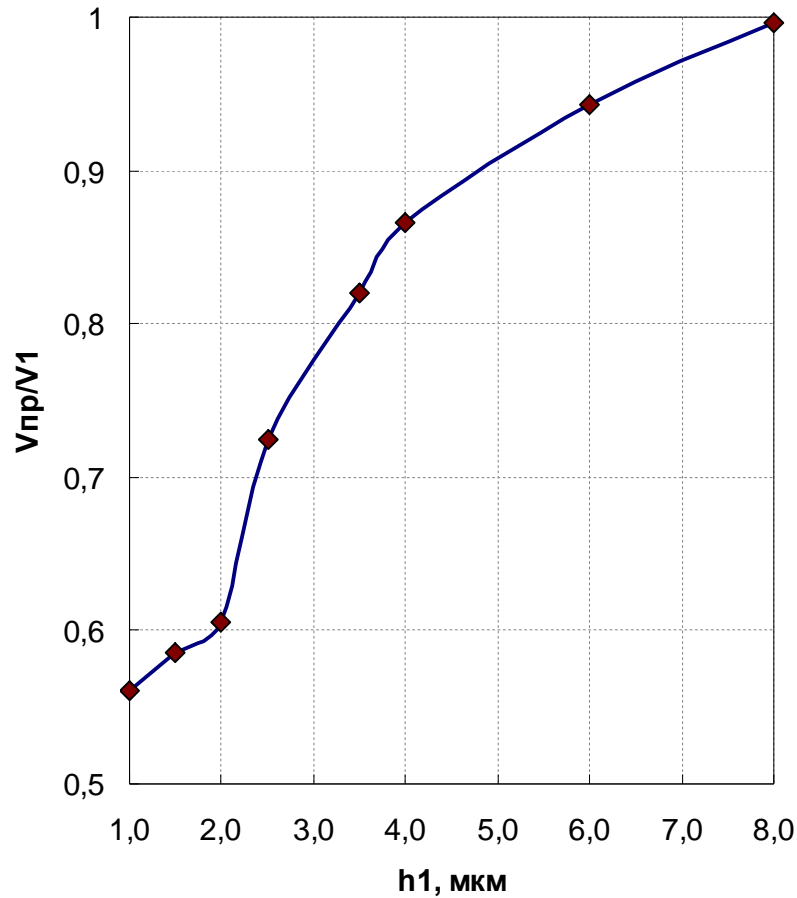


Рис. 3. Отношение напряжения пробоя диода Шоттки к напряжению на первом плавающем охранном кольце при пробое

### Выводы

В результате моделирования в САПР TCAD диода Шоттки с плавающими охранными кольцами обнаружено, что существует оптимальная ширина колец, при которой напряжение пробоя достигает максимума.

### Литература

1. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов: Пер. с англ. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 248 с.
2. Baliga V. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – Springer, 2008. – 2069 p.
3. Baliga V. J. Silicon Carbide Power Devices. – World Scientific Pub. Co. Inc., 2006. – 503 p.
4. Иванов П.А., Грехов И.В., Ильинская Н.Д., Самсонова Т.П., Потапов А.С. Высоковольтные (1800 В) планарные р–п-переходы на основе 4H-SiC с плавающими охранными кольцами. – ФТП., 2009. – Т. 43, вып. 4. – С. 527 – 530.
5. Seong-Jin Kim, Dong-Ju Oh, Soon-Jae Yu, Yong-Deuk Woo. Breakdown Voltage Characteristics of SiC Schottky Barrier Diode with Aluminium Deposition Edge Termination Structure. – Journal of the Korean Physical Society. –2006. – V.49. – P.S768 – S773.

Информация об авторах:

Сури́н Бори́с Па́влович, к.ф.-м.н., доцент кафедры микроэлектроники

Калабаев Игорь Сергеевич – студент факультета электронной техники